VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

MATERIALE COMPOZITE

RANFORSANȚII

Materialul complementar care este dispersat în faza continuă, numită matrice, reprezintă faza minoritară a compozitului. Acest material poate avea particularități geometrice diferite, rezultate din modul în care se realizează dispersarea în cele trei direcții ale spațiului. Astfel, faza minoritară poate prezenta o structură tridimensională, bidimensională sau unidimensională. În funcție de geometria formei lor, materialele complementare se împart în trei mari categorii:

- *particule disperse*, care au o formă tridimensională;
- *laminate*, acestea prezentând o formă bidimensională;
- *fibre*, cu formă unidimensională.

Fiecare categorie include numeroase alte tipuri de compozite, diferențiate după mărime, raportul lungime/diametru şi compoziția chimică în secțiunea transversală. Comparativ cu fibrele, particulele sunt mai uşor de realizat şi de înglobat în materialul matricei. În schimb, fibrele sunt de neînlocuit dacă se urmăreşte obținerea unui compozit cu tenacitate mare.

Materialele care au o formă tridimensională au primit denumirea de *umpluturi disperse*, iar cele de formă bidimensională sau unidimensională pe cea de *agenți de ranforsare (ranforsanți)*.

Fibrele sunt folosite ca elemente de ranforsare, având rolul de a prelua o mare parte din solicitările la care este supus materialul care formează matricea. Folosindu-se criteriul configurației geometrice se poate realiza clasificarea din figura 1.

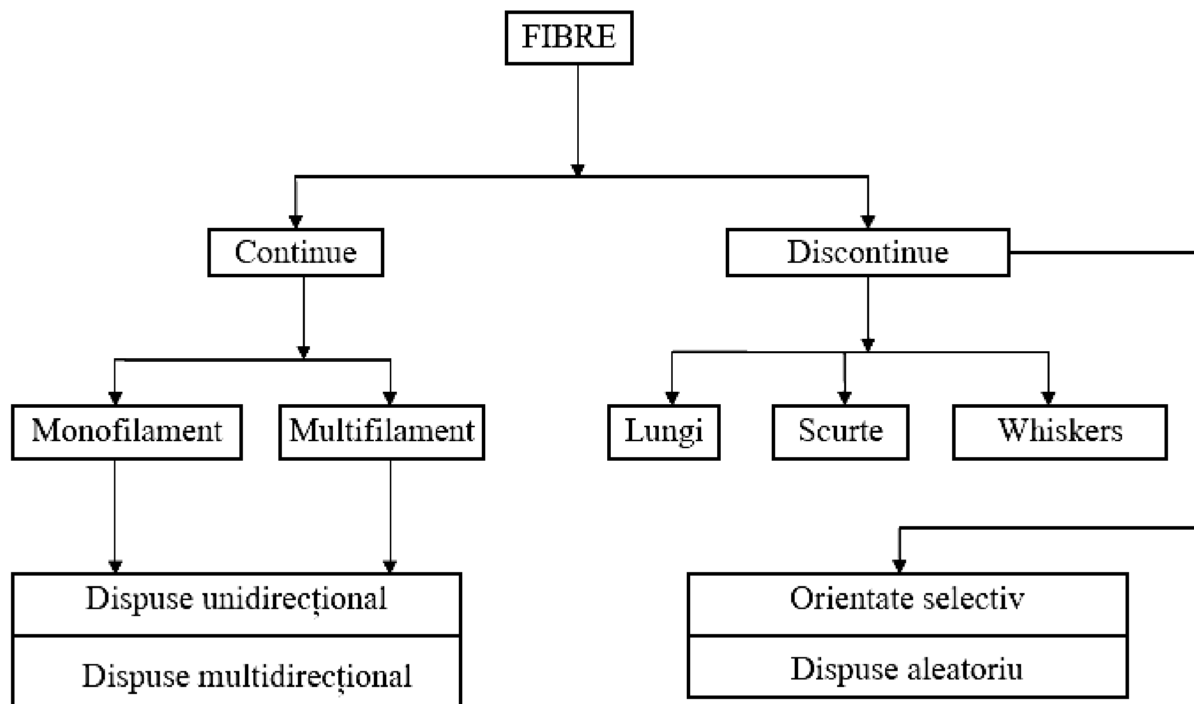


Fig. 1. Clasificarea fibrelor materialelor compozite în funcție de configurația geometrică

Fibrele continue sunt caracterizate prin valori mari ale raportului lungime/diametru (peste 1000), având forma unor fire simple (monofilament, cu diametrul peste 100 µm) sau răsucite (multifilament, cu diametrul de 5 – 25 µm). Se realizează din bor, carbon, sticlă, materiale ceramice, oțel inoxidabil, rășini și se folosesc sub diverse forme de aranjare: unidirecțională, tip țesătură (bidirecțională) sau spațială (tridirecțională).

Fibrele discontinue se pot produce ca atare sau rezulta prin fragmentarea fibrelor cu lungime mai mare. Fibrele lungi se caracterizează prin raportul lungime/diametru cuprins între 300 – 1000, lungimea lor fiind de câtiva milimetrii, iar diametrul de 3 – 10 µm. Fibrele scurte, obținute prin tăierea fibrelor continue sau discontinue lungi, sunt caracterizate de valori ale raportului lungime/diametru de circa 100, cu lungimea sub 300 µm, iar diametrul aproximativ 3 µm. Fibrele discontinue foarte scurte (whiskers), cu dimensiuni reduse (d < 1 µm), sunt constituite din monocristale filiforme de natură ceramică sau realizate din bor, carbon. În tabelul 1 sunt prezentate caracteristicile diferitelor fibre folosite pentru obținerea materialelor compozite de înaltă performanță.

Tabelul 1

Materialul	**Diametrul** **m**	**Rezistența la tracțiune** **MPa**	**Modulul de elasticitate** **GPa**	**Densitatea** **g/cm^3**	**Rezistența specifică**
Sticla	-	4000 – 6000	87000	2,5	$2 \cdot 10^{12}$
Grafit	8	2000	360000	1,92	1
Bor	100 – 200	3200	420000	2,7	1,2
Carbura de siliciu	100	1500 – 3000	490000	3,3	-
Kevlar 49	12	2700	130000	1,45	1,9
Hyfil	–	1800	17500	1,80	-

Folosirea materialului complementar sub formă de particule a cunoscut o mare extindere, datorită avantajelor importante pe care le prezintă, printre acestea numărându-se:

- costul mult mai scăzut, comparativ cu cel al fibrelor;
- tehnologii simple de înglobare și dispersare a particulelor în matrice;
- posibilitatea obținerii unor materiale izotrope

Există o mare varietate de particule produse din SiC, grafit, Al_2O_3, mică, SiO_2, nitrură de bor, sticlă, MgO, TiC, Si_3N_4, alice din oțel sau fontă, ZrO_2, TiO_2, Pb, Zn, cu dimensiuni care variază în limite largi, de la mai puțin de 1 µm (microcristale) până la 500 µm sau chiar mai mari. Particulele, mari sau mici (microparticule), de formă sferică, plată sau de altă configurație, se utilizează în special pentru producerea compozitelor cu rezistență mare la uzură, asigurând produsului realizat greutate redusă, stabilitate dimensională remarcabilă și capacitate mare de amortizare a vibrațiilor.

Prezența particulelor conduce însă la micşorarea alungirii şi deci a tenacității materialului (comparativ cu alungirea şi tenacitatea matricei), care determină limitarea folosirii acestora doar la producerea compozitelor care nu sunt solicitate excesiv la şoc mecanic şi termic. Particulele se folosesc, în cele mai multe cazuri, la producerea materialelor compozite cu matrice metalică. Compozitele metalice cu particule s-au diversificat foarte mult şi reprezintă, în momentul de față, o categorie de materiale de care nu se poate face abstracție, fiind relativ ieftine şi uşor de produs.

Pulberile folosite la realizarea materialelor compozite se produc prin diverse procedee chimice sau fizice, fiind preferate metodele care asigură grad mare de finețe şi puritate ale particulelor. În tabelul 2 sunt menționate câteva materiale sub formă de particule utilizate la producerea compozitelor.

Tabelul 2

Materialul	Densitatea g/cm^3	Coeficientul de dilatare termică x 10^{-6} C^{-1}	Rezistența la tracțiune MPa	Modulul de elasticitate GPa
SiC	3,21	5,40	–	324
Al_2O_3	3,98	7,92	221	379
TiC	4,93	7,60	55	269
ZrC	6,73	6,66	90	359

COMPOZITE CU MATRICE METALICĂ

Proprietățile compozitelor cu matrice metalică

Comparativ cu metalele şi aliajele metalice, compozitele din această familie au proprietăți superioare concretizate prin:

- rezistență ridicată la fluaj;
- sensibilitate redusă la ciclaj termic;
- stabilitate structurală mare;
- rezistență mecanică ridicată;
- rezistență la şoc bună.

Ranforsantul modifică într-o măsură apreciabilă proprietățile compozitelor, precum:

- coeficientul de dilatare termică;
- conductibilitatea termică şi cea electrică;
- modulul de elasticitate;
- rezistența şi plasticitatea;

- rezistența la oboseală

Compozitele cu matrice metalică ranforsate cu fibre ceramice posedă un coeficient de dilatare termică mai mic decât cel al matricei, deoarece fibrele ceramice au un coeficient de dilatare termică mic (de exemplu, compozitele cu matrice de Al şi fibre de SiC). Se pot obține prin ranforsare compozite al căror coeficient de dilatare termică pe direcția ranforsării este apropiat de zero (compozitele cu matrice de Mg şi fibre de carbon).

În cazul conductibilităților termice şi electrice se înregistrează în urma ranforsării matricei evoluții similare cu cele ale coeficientului de dilatare termică.

Modulul de elasticitate al compozitului înregistrează creşteri semnificative față de valorile obținute pentru matrice, mai ales dacă modulul de elasticitate al matricei este scăzut (de exemplu, la Al şi Mg).

Rezistența şi plasticitatea sunt influențate de comportarea la interfață şi de diferența dintre coeficienții de dilatare ai ranforsantului şi cei ai matricei. Diferențe mari determină apariția unor tensiuni termice, care pot deforma plastic matricea, rezultând întărirea matricei (la ciclare termică apar tensiuni care produc fisuri sau goluri la interfață şi reduc rezistența).

Rezistența la oboseală se măreşte atunci când fracția de ranforsant creşte. Se întâlnesc însă şi cazuri când apare o uşoară reducere a rezistenței la oboseală. De asemenea, temperatura la care compozitul este încălzit influențează rezistența la oboseală.

Proprietățile compozitelor metalice şi prețul acestora mai depind de *forma şi dispunerea ranforsantului*. De asemenea, o influență importantă asupra calității compozitelor o au *fenomenele asociate cu difuzia la interfața ranforsant-matrice*. Astfel dacă stratul format prin difuziune are o grosime mică, atunci el contribuie la creşterea adeziunii fibră-matrice. Adeziunea fibră-matrice este diminuată, dacă stratul rezultat prin difuziune are o grosime mare, aceasta determinând apariția unei zone fragile. Reducerea efectului difuziei se poate realiza fie prin acoperirea fibrelor cu un strat protector fie prin alierea matricei astfel încât cinetica interacțiunii fibrelor cu matricea să fie modificată. De exemplu, fibrele de bor incluse în matricea de titan încălzite la temperaturi de peste 600 ^{0}C dau naştere unei zone de interacțiune de grosime **d**, în care constituentul principal este TiB_2. Grosimea mare a acestui strat determină o diminuare a proprietăților compozitului. Prin protecția fibrei de bor înainte de includerea în matrice, folosind un strat de SiC, B_4C sau BN cu grosimea **a** de ordinul micronilor, stratul de difuzie este redus sensibil şi contribuie la creşterea legăturii fibră-matrice.

Fracția de fibre este un alt factor important care determină proprietățile materialului compozit. Raportul existent între cele două părți constitutive principale ale compozitului (fibra şi matricea) se poate exprima prin două mărimi fizice:

- fracția masică (M), care este luată în considerare în operația de dozare a componentelor din cadrul procesului tehnologic. Se exprimă prin raportul dintre masa componentului (ranforsant, m_F, sau matrice m_M) căruia i se determină participarea procentuală şi masa compozitului (m_C):

$$\begin{cases} M_F = \dfrac{m_F}{m_C}, \ \text{pentru ranforsant (fibra);} \\ M_M = \dfrac{m_M}{m_C}, \ \text{pentru matrice} \\ M_F + M_M = 1 \end{cases}$$

➢ fracția volumică (V), care este avută în vedere la faza de proiectare a materialului. Reprezintă raportul dintre volumul componentului (ranforsant, V_F, sau matrice V_M) căruia i se determină participarea procentuală şi volumul compozitului (V_C):

$$\begin{cases} V_F = \dfrac{V_F}{V_C},\ pentru\ \ ranforsant\ \ (fibra); \\ M_M = \dfrac{V_M}{V_C},\ pentru\ \ matrice \\ V_F + V_M = 1 \end{cases}$$

Tipuri de compozite cu matrice metalică

În ultimii ani s-au realizat numeroase compozite cu matrice metalică, elementele de ranforsare folosite fiind fibrele şi particulele. În tabelul 3 sunt prezentate câteva sisteme de compozite şi sunt evidențiate particularități tehnologice sau de comportare în utilizare.

Tabelul 3

Matrice	Fibre	V_F %	Particularități
Ni	TaC	6 – 8	– obținut prin solidificare eutectică
Al	B BSiC	20 – 60	– rezistență la oboseală foarte bună dată de fibrele de bor; – matrice atenuatoare a fisurilor apărute în utilizare; – temperatura de utilizare sub 200 ^{0}C pentru fibrele de bor neprotejate şi în jurul valorii de 400 ^{0}C pentru fibrele de bor protejate; – la peste 300 ^{0}C apare riscul formării borurilor de aluminiu
Al	SiC	10 – 60	– pot fi durificate prin îmbătrânire; – timpul de îmbătrânire este direct proporțional cu volumul de ranforsant; – coeficientul de dilatare termică variază în limite foarte largi, în funcție de fracția de ranforsant
Mg	Al_2O_3	10 – 60	rezistența la oboseală creşte cu fracția de ranforsant
NiAl	Ni_3Al	–	– rezistență la oxidare; – rezistență bună atât la temperaturi joase cât şi la temperaturi înalte
Cu	C	–	– rezistență la rupere ridicată; – conductivitate electrică
Si	C	–	– materiale abrazive
Ni, Cu, Ag	Nb	–	– superconductoare

COMPOZITE CU MATRICE CERAMICĂ

Proprietățile compozitelor cu matrice ceramică

Compozitele cu matrice ceramică sunt destinate utilizării la temperaturi înalte (mult peste 1000 ^{0}C) şi în comparație cu metalele şi aliajele posedă proprietăți superioare: *rezistență ridicată la fluaj, sensibilitate redusă la ciclare termică, stabilitate structurală ridicată, rezistență mecanică mare, rezistență la şoc termic*.

Realizarea materialelor compozite ceramice are ca scop principal reducerea fragilității matricei prin ranforsarea ei cu fibre. Pentru obținerea unor compozite performante, trebuie avute în vedere câteva aspecte:

- fibrele scurte şi ascuțite provoacă concentrarea tensiunii la extremitățîi, motiv pentru care o tenacitate mare este favorizată de prezența fibrelor continue;
- fibrele trebuie să reziste la temperaturi înalte;
- dacă fibra îşi pierde rezistența şi rigiditatea la temperaturi înalte, nu se îmbunătățeşte fragilitatea;
- diferențele mari dintre coeficienții de dilatare termică şi temperaturile mari de procesare pot induce tensiuni mecanice;

Legătura fibră-matrice influențează atât rezistența la rupere cât şi fragilitatea. S-a constatat că rezistența la rupere este mai mare, dacă legătura dintre fibre şi matrice este slabă. În funcție de natura solicitării, la compozitele ceramice se respectă următoarele recomandări:

- pentru temperaturi înalte se aleg componentele astfel încât să asigure coeficienți de dilatare termică de valori apropiate ($\alpha_F \approx \alpha_M$);
- în cazul unor solicitări mecanice puternice este obligatoriu ca modulul de elasticitate al fibrei să fie considerabil mai mare decât cel al matricei ($E_F > E_M$).

Tipuri de compozite cu matrice ceramică

Analiza compozitelor ceramice în funcție de natura componentelor permite evidențierea a două categorii distincte:

- cupluri fibră-matrice de acelaşi tip: SiC–SiC, BN–BN;
- cupluri fibră-matrice de tip diferit: SiC-alumină, SiC-ceramică sticloasă

În cazul în care se realizează compozite cu fibră şi matrice de acelaşi tip apare o compatibilitate între componente, care se manifestă prin stabilitate chimică şi fizică, prin coeficienți de dilatare comparabili. În tabelul 4 sunt prezentate câteva tipuri de compozite ceramice utilizate în prezent.

Tabelul 4

Matrice	Fibre	V_F %	Efectul ranforsării
Alumina	SiC (whisker)	< 25	– crește modulul de elasticitate; – scade densitatea; – crește rigiditatea; – crește foarte mult rezistența la tracțiune și tenacitate, cu până la 50 %; – crește toleranța la defecte; – crește rezistența la uzură; – crește rezistența la șoc termic
Alumina	ZrO_2	10 – 20	– crește tenacitatea; – crește rezistența la încovoiere;
Ceramică sticloasă (LAS)	SiC (mănunchiuri)	10 – 60	– rezistența și tenacitatea depind de legătura la interfață, aceasta putând fi controlată prin alegerea tratamentului termic; – crește rigiditatea
Si_3Ni_4	SiC sau TaC	–	– creșterea tenacității
BN	BN	–	– temperatura maximă de încălzire în aer este 850 0C, respectiv 2000 0C în atmosferă neutră sau protejată
TaC	C	–	– rezistență la uzură; – rezistența la șocuri termice

COMPOZITE CU MATRICE ORGANICĂ

Compozitele polimerice sunt segmentul de compozite cu cea mai largă utilizare datorită, în principal, tehnologiei de fabricare, relativ simplă, care permite un preț convenabil. Componentele sunt alese astfel încât să asigure proprietățile de utilizare dorite. Principalele probleme sunt legate de compatibilitatea fibră-matrice, temperatura de exploatare, caracteristicile mecanice urmărite și stabilitatea dimensională obținută.

Relativa ușurință de fabricare a compozitelor de acest tip permite dispunerea facilă a fibrelor în arhitecturilor dorite și astfel este posibilă determinarea prin calcul, cu aproximație suficient de bună, a proprietăților.

Tipuri de compozite polimerice şi proprietăţile lor

Compozite cu matrice termorigidă:

➯ *Compozite cu matrice poliesterică şi fibre de sticlă*. Cercetările experimentale au dovedit deosebita importanţă pe care o au agenţii de cuplare asupra proprietăţilor compozitelor de acest tip. Calităţile interfeţei formate depind de compatibilitatea agentului de cuplare cu matricea şi de mediul în care este menţinut materialul compozit.

➯ *Compozite cu matrice epoxidică şi fibre de sticlă*. Acest tip de compozite au un preţ mai mare decât cele poliesterice, dar se bucură de proprietăţi superioare care le recomandă pentru utilizarea în domeniile de vârf. Rezistenţa la forfecare interlaminară este ridicată, 30 MPa– 75 MPa, consecinţă a faptului că matricea epoxidică asigură cea mai bună legătură cu fibrele. Chiar şi în acest caz se utilizează agenţi de cuplare care să reducă în special efectele mediului asupra rezistenţei la rupere. Sunt sensibile la prezenţa apei, care prin interfeţe slabe sau prin difuziune în matrice ajunge în contact cu fibrele şi le degradează. În acelaşi timp apar modificări ale temperaturii de tranziţie sticloase care scad performanţele, în special în cazul utilizării la temperaturi înalte.

➯ *Compozite cu matrice epoxidică şi alte tipuri de fibre*. Fibrele de carbon şi aramidele sunt preferate fibrelor de sticlă pentru obţinerea de compozite performante, deşi analiza valorilor specifice R_m/ρ, E/ρ în cazul fibrelor de sticlă arată că acestea pot asigura proprietăţi comparabile sau chiar mai bune. Fibrele de carbon şi aramidele prezintă însă dezavantajul preţului ridicat. Rezistenţa bună la compresiune şi la oboseală a fibrelor de bor poate fi utilizată la îmbunătăţirea comportării compozitelor ranforsate cu fibră de sticlă. Se realizează compozite hibride prin înlocuirea unei părţi a fibrelor de sticlă cu fibre de carbon, efectul fiind creşterea de 2 – 3 ori a rezistenţei la încovoiere (**$R_{încov}$**) şi a modulului de elasticitate, **E** (tabelul 5). Temperatura maximă de utilizare este limitată de proprietăţile matricei şi se situează între 101 ^{0}C şi 125 ^{0}C.

Tabelul 5

Tipul de compozit	Fibre de sticlă %	Fibre de bor %	$R_{încov}$ MPa	E MPa
Epoxi+Fibre de sticlă	55	0	530	22000
Epoxi+Fibre de sticlă+Fibre de bor	44	8	1280	65000

Proprietăţi foarte bune se obţin la compozitele cu fibre de bor şi carbon în matrice epoxidică. În special în cazul fibrelor de bor s-au obţinut proprietăţi remarcabile:

- rigiditate şi rezistenţă comparabile cu cele ale oţelurilor;
- rezistenţe la compresie şi oboseală foarte bune;
- masă specifică redusă

În tabelul 6 sunt prezentate caracteristicile mecanice ale unor laminate cu matrice epoxidică ranforsată cu fibre de bor şi de carbon. Proprietăţile foarte bune se datorează adeziunii foarte bune dintre matrice şi fibre, care conferă o rezistenţă la forfecare foarte mare. Dezavantajul major îl constituie preţul ridicat al fibrelor de bor.

Tabelul 6

Matrice	Fibre	Rezistența la tracțiune MPa	Rezistența la compresie MPa	E MPa	ρ g/cm^3
Epoxidică	Bor	700	1750	13000	2
	Carbon	680	650	7000	1,60

Compozite cu matrice termoplastă

Avantajele compozitelor cu matrice termoplastă rezidă în calitățile matricei, care, spre deosebire de cea termorigidă (termoreactivă+), prezintă o tenacitate ridicată, nu are tendința de a absorbi apa, rezistă la solvenți şi se poate utiliza la temperaturi relativ ridicate. Ranforsarea cu fibre conduce adeseori la ridicarea temperaturii de utilizare. De exemplu, fibrele de sticlă încorporate în matricea termoplastă determină creşterea temperaturii maxime de utilizare cu 10 ^{0}C până la 30 ^{0}C, cea mai înaltă temperatură de utilizare fiind înregistrată pentru matricea de polietersulfon cu fibre de sticlă, care poate fi utilizată până la 190 ^{0}C.

Rezistența la temperatura ridicată este influențată şi de forma şi dispunerea ranforsantului. S-a constatat o diminuare semnificativă a modului de elasticitate longitudinal, dacă este depăşită o temperatură critică.

Rezistența la fluaj este îmbunătățită prin ranforsarea cu fibre, cele mai bune rezultate obținându-se în cazul ranforsării cu fibre de carbon.

Compozitele cu matrice termoplastă posedă o tenacitate ridicată, care se manifestă chiar şi în cazul crestăturilor ascuțite.

Rezistența la oboseală depinde de natura, cantitatea şi forma ranforsantului.